

Zahnärztliches Institut der Universität Zürich

Aus der Kronen- und Brücken-Abteilung
Vorstand: Prof. Dr. E. Dolder

Die Geschwindigkeitsverhältnisse im Ablauf der Kaubewegung

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde
der medizinischen Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von
MARCO FISCH
von Weinfelden

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. E. Dolder

Buchdruckerei Fluntern, Plattenstrasse 27, Zürich 7
Zürich 1953

Zahnärztliches Institut der Universität Zürich

Aus der Kronen- und Brücken-Abteilung

Vorstand: Prof. Dr. E. Dolder

Die Geschwindigkeitsverhältnisse im Ablauf der Kaubewegung

INAUGURAL - DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde
der medizinischen Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von

MARCO FISCH

von Weinfelden

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. E. Dolder

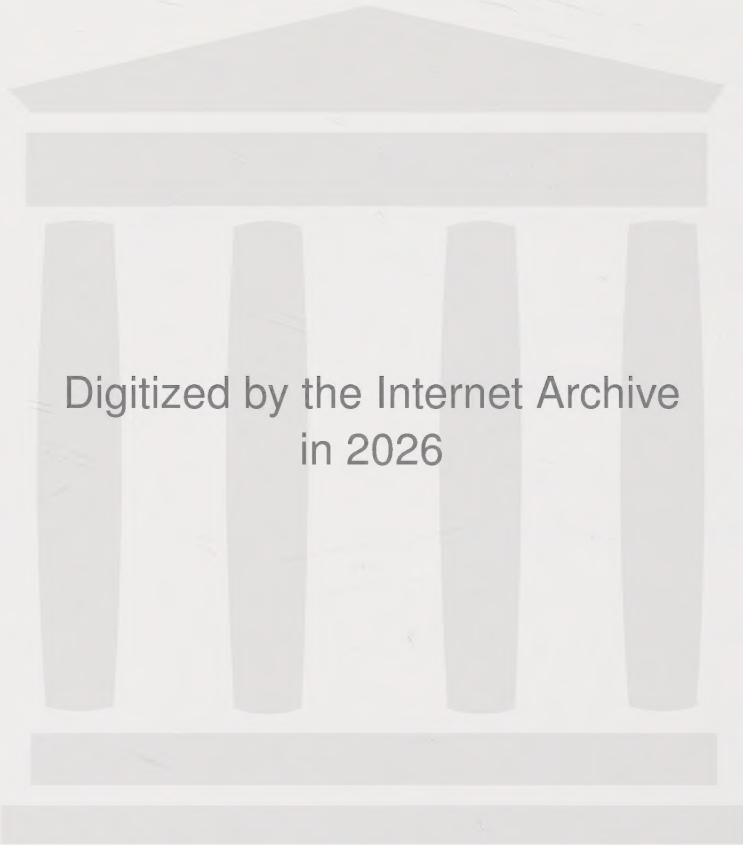
Buchdruckerei Fluntern, Plattenstrasse 27, Zürich 7
Zürich 1953

*Meiner lieben Mutter
und meinem Onkel Dr. F. Fisch in Lugano
gewidmet*



INHALTSVERZEICHNIS

I.	Einleitung und Problemstellung	5
II.	Bisherige Methoden	7
III.	Eigene Methode	10
	1. Versuchsanordnung	14
	2. Auswertung der Aufnahmen	17
	3. Geschwindigkeitsanalyse der registrierten Kaubahnen	22
	4. Die untersuchten Fälle	27
	5. Versuchsergebnisse	30
	6. Auswertung der Ergebnisse	41
IV.	Schlussbetrachtungen	47
V.	Zusammenfassung	49
VI.	Literaturverzeichnis	50



Digitized by the Internet Archive
in 2026

I. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Ueber das Thema der Unterkieferbewegungen sind schon zahlreiche Arbeiten geschrieben worden, wobei das Problem von den verschiedensten Seiten her und mit verschiedensten Methoden angegangen wurde. Es ist aber in der Fülle der diesbezüglichen Arbeiten eine gewisse Entwicklungstendenz in der Art der Problemstellung und der Methodik zu erkennen.

Die Vervollkommenung der technischen Hilfsmittel hat es einerseits ermöglicht, den Ablauf der natürlichen Kaubewegung ohne allzu störende Eingriffe (in Form von Gesichtsbögen, Stiften, Registrierapparaten u.s.w.) naturgetreuer und genauer festzuhalten. Andererseits hat sich auch die Fragestellung in dem Sinne geändert, dass man die Unterkieferbewegungen immer mehr in ihrem engeren Zusammenhang mit dem Kauakt zu erforschen versuchte, wobei also das Problem auch vom funktionell teleologischen Standpunkt aus anvisiert wurde. Diese Entwicklung ist ja auf dem ganzen Gebiet der Prothetik festzustellen, indem man sich immer mehr von der rein mechanischen und kausalen Denkweise loszulösen versucht, um dafür das Problem mehr im gesamtbiologischen Geschehen zu sehen. Wir können also auch hier den Uebergang von einer statischen zu einer dynamischen Betrachtungsweise feststellen.

Unter solchen biologischen Aspekten sind bereits einige Arbeiten über Unterkieferbewegungen aus dem Zahnärztlichen Institut der Universität Zürich (Eberhard Diss. Zürich 1947, Stocker Diss. Zürich 1952, Briner Diss. Zürich 1953) erschienen, wobei die Bewegungen eines Unterkieferpunktes photographisch (Stocker), kinematographisch (Eberhard) und im Zusammenhang mit den wechselnden Druckverhältnissen beim Kauen (Briner) festgehalten wurden.

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit soll sein, die Kinematik der Kaubewegungen derart darzustellen, dass die Geschwindigkeitsverhältnisse innerhalb des Bewegungsablaufes genauer analysiert werden können. Die Untersuchungen haben vorerst eine rein physiologische Bedeutung, wobei die Bewegungen des Unterkiefers ge-

samthaft in die grosse Gruppe der reflektorisch bedingten Bewegungen des menschlichen Organismus eingeordnet werden sollen.

Es ist unverkennbar, dass die vegetativen Lebensäusserungen eines Lebewesens sich mit einer gewissen Regelmässigkeit und in einem bestimmten Rhythmus abspielen. Die Regulation und die Wechselwirkungen der vegetativen Funktionen wurden von W. R. Hess im Ueberblick dargestellt. Es war naheliegend zu versuchen, den Kauakt als motorische Aeussderung auch in dieses rhythmische Geschehen einzureihen. Die eindeutige bisherige Feststellung war, dass die Kaubahnen in ihrem Verlauf sehr unregelmässig und variabel sind. Man konnte zwar eine gewisse Grundform der Kaubahnen in der Frontal-, Sagittal- und Horizontalebene festlegen (Stocker). Dabei wurde angenommen, dass sich diese Grundform im Einzelfalle der jeweiligen Konsistenz des Bissens anpasst und durch die individuell verschiedene Temperamentanlage der Versuchsperson mitbeeinflusst wird (Stocker-Eberhard). Es wurden auch Hinweise auf die Geschwindigkeitsverhältnisse der Kaubewegung gemacht, wobei man aber lediglich eine gewisse Verlangsamung beim Uebergang von der Oeffnung zur Schliessung feststellte, ohne aber auf die näheren Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Kaubahnform einzugehen (Eberhard).

Zweck der folgenden Untersuchungen war, den Ablauf der Kaubewegungen in genaue Beziehung zur Zeit zu bringen, um dabei festzustellen, ob der Faktor Zeit als ordnendes Prinzip in die Vielfalt der Kaubahnformen eingreife.

Die Formeln, die im Laufe dieser Untersuchungen aufgestellt werden, dienen nicht dazu, ein biologisches Geschehen in einen starren mathematischen Rahmen hineinzuzwingen, sie sind vielmehr als Hinweise auf den oben erwähnten Rhythmus der menschlichen Bewegungen (Kretschmer) aufzufassen, die mit den Pendelbewegungen der Physik wohl eine gewisse Aehnlichkeit besitzen, ihrem Wesen nach aber von diesen grundverschieden sind.

II. BISHERIGE METHODEN

Die bisherigen Autoren haben sich lediglich mit der Aufzeichnung der Kaubahnen befasst, ohne weiter auf deren zeitlichen Ablauf genauer einzugehen.

Sobald wir einen Geschwindigkeitsablauf festhalten wollen, müssen wir in der Lage sein, den in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg aufzuzeichnen gemäss der Formel:

$$v = \frac{s}{t}$$

(v =Geschwindigkeit, s =Weg, t =Zeit).

Es kommen für uns also nur solche Methoden zur Registrierung der Kaubahnen in Frage, bei denen irgendwie die Möglichkeit besteht, den zeitlichen Ablauf zu markieren.

a) *Die direkte visuelle Beobachtung* (Lubosch, Ganzer, Zsigmondy) kann nur gewisse Hinweise auf den zeitlichen Ablauf der Kieferbewegungen geben. Da sie auf rein subjektiven Wahrnehmungen beruht, und damit a priori durch Vorstellungen des Beobachters beeinflusst ist und zudem noch die Bewegungen wegen ihrer Kleinheit schwierig wahrzunehmen sind, fällt sie als exakte Untersuchungsmethode ausser Betracht.

b) *Die graphischen Methoden* (Schulze, Beth, Schröder, Vest, Gysi) kommen für obliegende Untersuchungen nicht in Frage, da bei den bisherigen Versuchsanordnungen keine Zeitmarkierung möglich war. Eine neue graphische Methode von Jankelson, Hoffmann und Hendron gestattet, die Zeit gleichzeitig zu markieren. Es wurde unterhalb vom Gnathion des Patienten ein Blasbalg in einem fixen Abstand vom Schädel befestigt. Sobald der Patient Kaubewegungen ausführte und sich dadurch der Abstand Gnathion—Schädel veränderte, entstanden im Inneren des Blasbalges Druckveränderungen, die mit Zeitmarkierung als Kurve aufgezeichnet wurden. Es können bei dieser Methode jedoch nur Bewegungen in vertikaler Richtung

festgehalten werden, und dazu kommt noch eine Verzerrung der Kaubahn, die nicht mehr als geschlossene Kurve, sondern als sinusoidale Linie in Erscheinung tritt.

c) *Die photographische Methode* wurde in früheren Arbeiten von Münzesheimer und Wustrow angewandt. Kurth hat bei Anwendung dieser Methode erstmals eine Zeitmarkierung in Form einer Stroboskoplampe angebracht. Das intermittierende, in regelmässigen Zeitintervallen auftretende Aufleuchten eines monochromatischen Lichtstrahles ergab auf der photographischen Platte eine Reihe von Punkten einer Kaubahn, die immer durch den gleichen Zeitabstand charakterisiert waren. Der Autor hat dabei auch auf die Notwendigkeit hingewiesen, die Lampe in Zeitabständen von mindestens $\frac{1}{25}$ Sek. aufleuchten zu lassen, um eine genaue Analyse der aufgenommenen Kaubahnen zu ermöglichen. Auf diesen Hinweis, die Frequenz der Zeitmarkierung der zu untersuchenden Bewegung anzupassen, werden wir noch im Laufe unserer Untersuchungen zurückkommen. Der Nachteil der Methode von Kurth besteht darin, dass man nur einzelne Kaubewegungen mit ihr erfassen kann, da sich mehrere Kaubahnen übereinander projizieren und man sie nachher nicht mehr auseinanderhalten kann. Stocker hat ebenfalls auf diese Schwierigkeit aufmerksam gemacht. Bei seinen Untersuchungen treten die Kaubahnen als ausgezogene Linien in Erscheinung, wodurch es mit einiger Erfahrung möglich war, auch bei der fortlaufenden Aufnahme die einzelnen Kaubahnen auseinander zu halten.

d) *Die kinematographische Methode* ist in neuerer Zeit das in der Physiologie meistverwendete Mittel, um einen Bewegungsablauf genauer festzuhalten. Sie wurde deshalb schon des öftern zur Analyse von Kaubewegungen herangezogen (Hildebrand, Bakker, Eberhard, Briner).

Eine methodische Variation stellt die Röntgenkinematographie dar, wie sie von Hildebrand, Jankelson, Hoffmann und Hendron verwendet wurde.

Der fixe Punkt am Unterkiefer, dessen Bewegung man verfolgt, wird auf die Haut des Kinns mit Farbe aufgetragen (Bakker) oder es wird mit einer Schiene ein Stab mit einer kleinen Kugel an der unteren Frontzahnreihe befestigt (Eberhard, Briner). Bei der Röntgenkinematographie wird meistens eine kleine radioopake Markie-

rung zwischen den unteren mittleren Schneidezähnen angebracht. Die Punktmarkierung kann entweder einmal auf einer einzigen Ebene (Bakker), nacheinander auf verschiedenen Ebenen (Eberhard) oder gleichzeitig auf verschiedenen Ebenen (Hildebrand, Briner) aufgenommen werden. Die Zeitmarkierung ist durch die zeitlich gleichmässige Vorwärtsbewegung des Filmstreifens in der Kamera gegeben; diese kann durch Aufnahme eines Chronometers zuerst getestet werden. Konstante Aufnahmefrequenz vorausgesetzt, besteht so zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen immer die gleiche Zeitspanne. Durch das zeitliche Aufeinanderfolgen der Aufnahmen können allfällige Uebereinanderprojektionen verschiedener aufeinanderfolgender Kaubahnen auseinandergehalten werden. Die Methode erlaubt somit, die Geschwindigkeit mit der jede einzelne Strecke zurückgelegt wird, zu berechnen.

III. EIGENE METHODE

Der Unterkieferknochen selbst und seine Bewegung während des Kauens werden der Sicht durch die bedeckenden Weichteile (Wange, Lippe) entzogen.

Um diese Bewegung auf einem Filmstreifen darzustellen, bieten sich zwei Möglichkeiten.

a) Direkte Durchdringung der bedeckenden Schicht mit Röntgenstrahlen. Die Bewegung der Mandibula wird direkt dargestellt, da der gefilmte Punkt unmittelbar an der unteren Zahnreihe befestigt ist. Die absolute Grösse der bei den Kaubewegungen durchlaufenen Strecken ist aber derart klein, dass es sehr schwierig ist, sie durch Röntgenkinematographie direkt auszuwerten.

b) Verlegung des sich bewegenden Punktes ausserhalb der Mundhöhle, was wiederum auf zwei Arten geschehen kann:

1. Markierung einer Hautstelle, die den Unterkiefer bedeckt, was eine gewisse Fehlerquelle ergibt, da die Haut sich auf der knöchernen Unterlage verschieben kann. Bei einer solchen Markierung kann zudem eine unregelmässige Verzerrung des Bildes entstehen, woraus keine genauen Rückschlüsse auf die in Wirklichkeit stattgefundene Bewegung gezogen werden können.
2. Der Markierungspunkt wird unverschieblich an der unteren Zahnreihe befestigt und durch eine Vorrichtung ausserhalb der Mundhöhle verlegt. Wir bekommen auch hier eine verzerrte Wiedergabe der Bewegung im Bild; diese Verzerrung ist aber genau zu berechnen.

Berechnung der Verzerrung der Darstellung

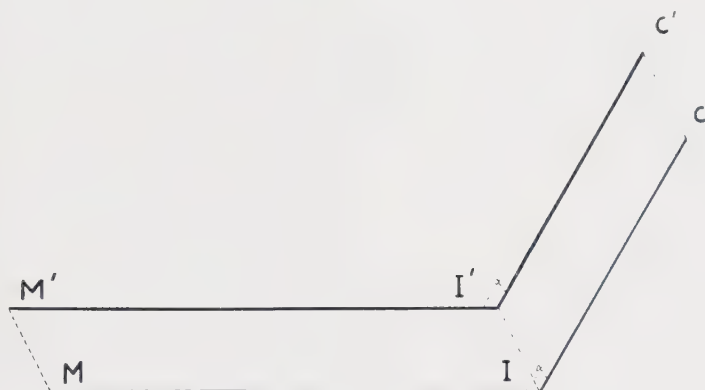


Abb. 1: Translatorische Bewegungen des Unterkiefers
I = Incisale, C = Condylus, M = Markierungspunkt

Vorausgesetzt, dass der Winkel α bei I immer konstant bleibt (Abb. 1), sind M, I, C drei Punkte eines starren Systems. Bei jeder Verschiebung eines solchen Systems im Raume können wir zwei Bewegungsarten unterscheiden, nämlich translatorische und rotatorische Bewegungen.

a) Da bei einer translatorischen Bewegung sämtliche Punkte eines solchen starren Systems die gleichen Geschwindigkeitsverhältnisse aufweisen, werden wir durch unsere Vorrichtung keinerlei Verzerrung des Bewegungsbildes bekommen. (Abb. 1)

b) Bei rotierenden Bewegungen müssen wir ein Rotationszentrum R annehmen (Abb. 2).

Da die Winkelgeschwindigkeit für jeden Punkt des Systems die gleiche ist, so ergibt sich, dass

$$MM' = \alpha RM \quad II' = \alpha RI \quad \frac{MM'}{II'} = \frac{\alpha RM}{\alpha RI} = c$$

Die Geschwindigkeit des Punktes M ist also durch einen konstanten Vergrößerungsfaktor c mit der Geschwindigkeit des Punktes I verbunden. Wenn wir nun die Funktionen, die die Geschwindigkeit der Punkte M und I mit der Zeit verbinden, mit $v=f'(t)$ und $v=f(t)$

bezeichnen, so können wir die Gleichung $f'(t)=f(t)c$ aufstellen. Da aber ein konstanter Multiplikationsfaktor den Charakter einer Funktion nicht weiter verändert und uns nicht die Berechnung des absoluten Wertes, sondern vielmehr der relative Ablauf der Bewegung in Hinsicht auf die Zeit interessiert, so können wir diesen Vergrößerungsfaktor c unberücksichtigt lassen.

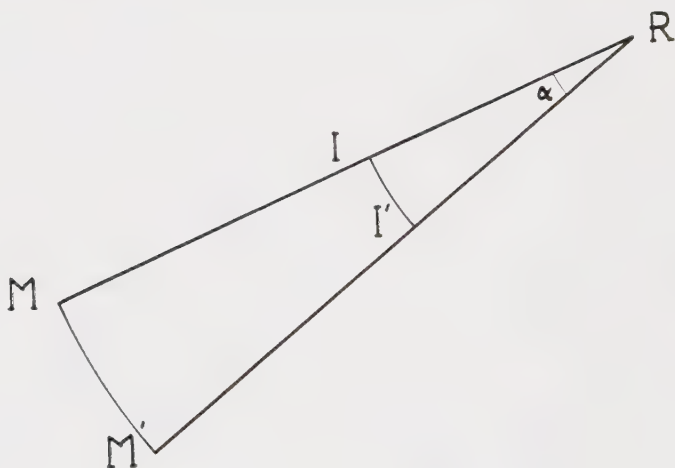


Abb. 2: Rotatorische Bewegungen des Unterkiefers
R = Rotationspunkt, I = Incisale, M = Markierungspunkt

Zur Veranschaulichung haben wir zwei derartige Funktionen graphisch dargestellt (Abb. 3).

Wenn wir die obere und die untere Kurve betrachten, so sehen wir, dass beide einen im Charakter ähnlichen Gesamtverlauf aufweisen. Durch den Faktor c wird die ursprüngliche Kurve (die mittlere in der Abbildung 3) entweder senkrecht auseinandergezogen ($c > 1$) oder aber zusammengepresst ($c < 1$). Eine Parabel wird aber z. B. immer noch eine solche bleiben, oder eine sinusoidale Kurve wird ihren periodischen Charakter beibehalten.

Wahl der Zeiteinheit. Die Betrachtungen, die wir oben über die optische Verzerrung angestellt haben, können wir auch auf die zeitliche Verzerrung übertragen. Die Gesetzmässigkeit, die den Geschwindigkeitsablauf mit der Zeiteinheit verbindet, wird durch längere oder kürzere Zeiteinheiten in ihrem Charakter keineswegs

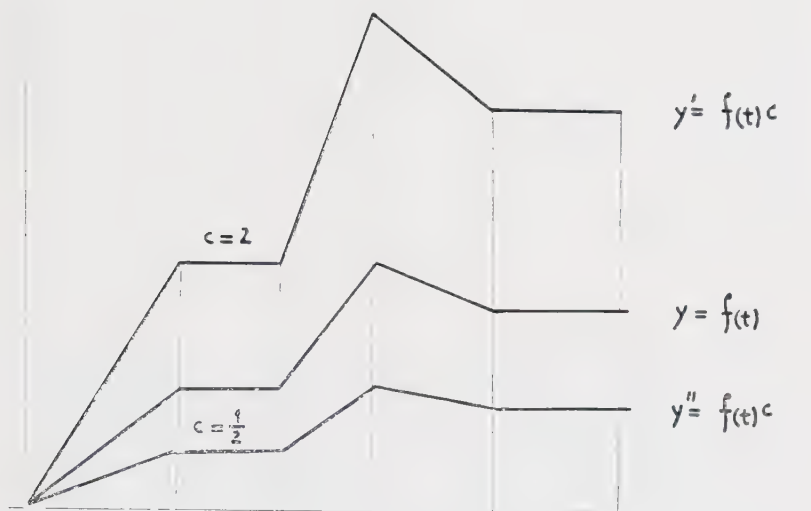


Abb. 3: Verzerrung einer graphischen Funktionsdarstellung durch einen konstanten Multiplikationsfaktor

beeinflusst. Wenn wir nämlich die ursprüngliche Zeiteinheit mit t bezeichnen, so wird je nachdem ob $1 < c$ oder $c < 1$, tc eine nach Belieben längere oder kürzere Zeitspanne darstellen.

Da $f(tc) = f(t)c$ haben wir hier wiederum einen ähnlichen Fall wie in der Abb. 3. Je rascher der Filmstreifen in der Kamera durchläuft, eine desto grössere Punktzahl bekommen wir in der Kaubahn. Es ist einleuchtend, dass unsere Analyse umso genauer sein wird, je kleiner wir unsere Zeiteinheit wählen.

Für unsere Aufnahmen wurde eine Frequenz von 64 Auf./Sek. gewählt. In unseren graphischen Darstellungen entspricht also die Zeiteinheit einer $1/64$ Sek. Diese Zeiteinheit ist durch die Konstruktionsart der Filmkamera gegeben (Paillard, H 16, Objektiv Yvar, 1:2,8; $f=75$ mm). Je kleiner die Zeiteinheit, desto stärker wird teilweise auch der angewandte Vergrößerungsfaktor kompensiert.

1. Versuchsanordnung

Zuerst wurde der Versuchsperson eine vorher hergestellte kleine Kunststoffschiene (KST - Abb. 4) an der unteren Frontzahnreihe befestigt. Es wurde besonderen Wert darauf gelegt, dass die Exkursionen des Unterkiefers durch die labial angebrachte Schiene keineswegs beeinträchtigt wurden. In der Kunststoffschiene wurde ein starrer Draht von 2 cm Länge und 2 mm Durchmesser einpolymerisiert, der in der Mittellinie des Gesichtes die Rima oris verliess. Durch eine S-förmige Abbiegung nach oben störte er den Lippenschluss in der Ruhelage nicht. (a)

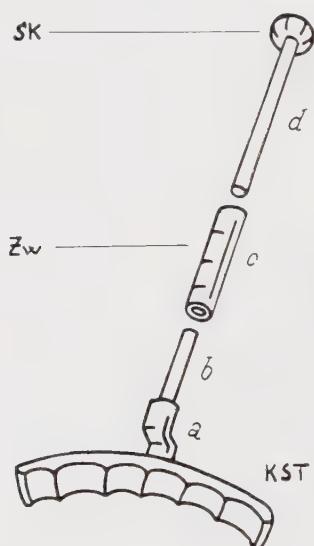


Abb. 4: Schematische Darstellung der Registriervorrichtung an der unteren Zahnreihe

SK = Stahlkugel, ZW = Zwischenstück, KST = Kunststoffschiene

Am freien Ende dieses Drahtes wurde als Fortsetzung ein weiterer Stahldraht von 1 cm Länge und 1 mm Durchmesser angelötet (b). Auf dieses Verlängerungsstück wurde nun als Zwischenstück (ZW) ein 2 cm langes Messingröhrchen, dessen Lumen 1 mm Durchmesser beträgt, aufgeschoben (c). Am anderen Ende des Messingröhrchens wurde ein weiteres 2 cm langes gerades Drahtstück (d)

(Durchmesser 1 mm) eingesteckt, an dessen Ende als Registrierpunkt ein hochglanzpolierte Stahlkugel (SK) (Durchmesser 2 mm) angelötet war. Diese Anordnung erlaubte nach dem Einsetzen der Kunststoffschiene im Munde des Probanden, das Drahtstück (d) vor dem Einfügen in das Röhrchen (c) auf einer Russflamme einwandfrei zu schwärzen, um störende Lichtreflexe neben der reflektierenden Kugel bei der Aufnahme zu vermeiden. Die Gesamtlänge der Registriereinrichtung betrug so 5 cm.

Der Kopf der sitzenden Versuchsperson wurde unverschieblich an einer Kopfstütze fixiert, um Eigenbewegungen auszuschalten, und so gelagert, dass die Camper'sche Ebene und der Draht b—c—d der Registriervorrichtung horizontal verliefen.



Abb. 5: Registrier-Einrichtung an der Versuchsperson

SK = Stahl-Kugel

Sp 1 = Spiegel für Sagittal-Aufnahme

Sp 2 = Spiegel für Horizontal-Aufnahme

Fk = Fadenkreuz

L = Lichtquelle

Um die Bewegungen der Registrierkugel gleichzeitig auf 3 zueinander senkrecht stehenden Ebenen aufnehmen zu können, wurden

zwei Spiegel mit versilberter Oberfläche angebracht, die zur Sagittal- und Horizontalebene einen Winkel von 45° bildeten (Abb. 5) und dadurch nach dem Strahlenbiegungsgesetz sämtliche Bilder, die sich auf diesen zwei Ebenen befinden, auf eine Frontalebene projizierten. Somit war es möglich, mit einem einzigen Aufnahmeapparat die Kaubewegungen in den drei zueinander senkrecht stehenden Ebenen (Frontal-, Sagittal- und Horizontalebene) gleichzeitig auf demselben Filmbild zu verfolgen.

Die einzige Schwierigkeit dieser Methode bestand darin, die geeignete Abblendung in der Kamera zu finden, um eine günstige Tiefenschärfe des Filmbildes zu bekommen. Die zwei virtuellen Registrierpunkte befinden sich nämlich in einem etwas grösseren Abstand (5 cm) von der filmenden Kamera als die reelle Stahlkugel (155 cm) (Abb. 6).

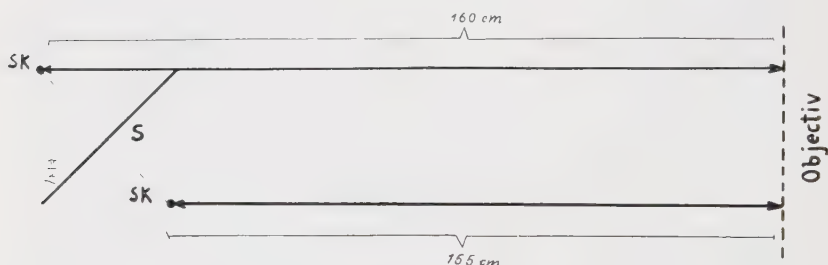


Abb. 6: Spiegelanordnung und Tiefenschärfe

Der Abstand: Objektiv — reeller Registrierpunkt (sk) ist kleiner als der Abstand: Objektiv — virtueller Registrierpunkt (SK'). S = Spiegel.

Als Lichtquelle wurde eine Lampe mit grosser Lichtintensität (Leitz Monla Lampe; volle Belastung) mit Einfallwinkel schrägseitlich von oben verwendet, da bei der hohen Aufnahme Frequenz (64/Sek.) die Belichtungszeit jedes einzelnen Bildes verhältnismässig kurz war.

Einige Vorversuche ermöglichten es, einen Kompromiss zwischen maximaler Lichtintensität und grösstmöglicher Abblendung zu finden, sodass die Aufnahmen eine für die Auswertung ausreichende Schärfe aufwiesen. (Für Gang 16 Blende 8, für Gang 32 Blende 4, für Gang 64 Blende 2,8). Als Koordinatensystem diente ein an einem Stativ befestigtes Fadenkreuz ($14,0 \times 14,0$ cm) aus Seide (Crinal-

faden: 0,05 mm Durchmesser, Abstand vom Subnasale der Versuchsperson 10 cm, Entfernung Fadenkreuz—Lampen—Filament = 23 cm), welches durch Reflexion der auffallenden Lichtstrahlen als eigene Lichtquelle wirkte und sich als fixes Beziehungssystem bei jeder Aufnahme an gleicher Stelle abzeichnete. Die Filmkamera wurde auf einem stabilen Gestell aufgeschraubt, ihr Objektiv war in einem konstanten Abstand von 1,5 m vom Fadenkreuz entfernt. Der Raum war im übrigen völlig verdunkelt.

Vor den Aufnahmen polierten wir mit einem Wildlederlappen die am berussten Endstück (d) angelötete Stahlkugel (sk). Mit einer Pincette wurde dann dieses Endstück in das Messingrohr (c) eingeschoben. Ein schwarzes Tuch, das die Schultern der Versuchsperson umhüllte, verhinderte weitere störende Reflexflächen im Aufnahme-feld. Das Stativ, mit welchem die Spiegel und das Fadenkreuz fixiert wurden, war schwarz angestrichen; dadurch zeichneten sich beim Aufleuchten der Lichtquelle der Registrierungspunkt, seine zwei Projektionen und das Fadenkreuz auf dem dunkeln Hintergrund deutlich ab. Es wurde absichtlich ein nicht zu empfindliches Film-material (Kodak Super-X) verwendet, sodass auf den Aufnahmen lediglich die drei Registrierpunkte und das Fadenkreuz deutlich zur Darstellung kamen. Der Versuchsperson wurde weiches Brot als Nahrungsprototyp zum Kauen verabreicht; sie hatte lediglich den Auftrag, den Bissen zu zerkauen und zu schlucken, wie sie es üblicherweise gewohnt war. Vorerst wurde sie angewiesen, einige Bissen ohne Filmaufnahme zu zerkauen und zu schlucken, um sich etwas an die verlangte Situation gewöhnen zu können. Jede Beeinflussung durch Zureden wurde streng vermieden, um einen möglichst natürlichen Kauakt zu erhalten. Erst nach dieser Adaptation der Versuchsperson wurde mit den Filmaufnahmen begonnen, die jeweils ca. 4 Minuten dauerten. Von den 2 Versuchspersonen wurden je 160 Kau-perioden aufgenommen.

2. Auswertung der Aufnahmen

Um die Kaubewegungen als Kaubahnen graphisch erfassen zu können, wurde der entwickelte Filmstreifen Bild für Bild mit einem Projektor im konstanten Abstand von 3 m auf ein vertikal fixiertes

Kartonblatt in 85-facher Vergrößerung projiziert. Zu diesem Zwecke wurde eine besondere Schiebevorrichtung zum bildweisen Vorschub am Projektor angebracht. Das Fadenkreuz, welches auf jeder Aufnahme zur Darstellung kam, gestattete die Bilderfolge immer in der gleichen räumlichen Lage zu projizieren. Der rechte äusserste Punkt des horizontalen Äquators jedes einzelnen Registrierpunktes wurde dann durch eine kleine Bleistiftmarke auf dem Kartonblatt festgehalten.

Nachdem jede Kaubahn punktweise auf einem Blatt abkopiert war, wurden sämtliche Punkte durch eine Linie verbunden (Abb. 7 B). Die Geschwindigkeit v der Kaubewegung in Abhängigkeit des Zeitintervalls $t = 1/64$ (Abstand zwischen den einzelnen Punkten der aufgezeichneten Kaubahn) zeigt die Abb. 7 A.

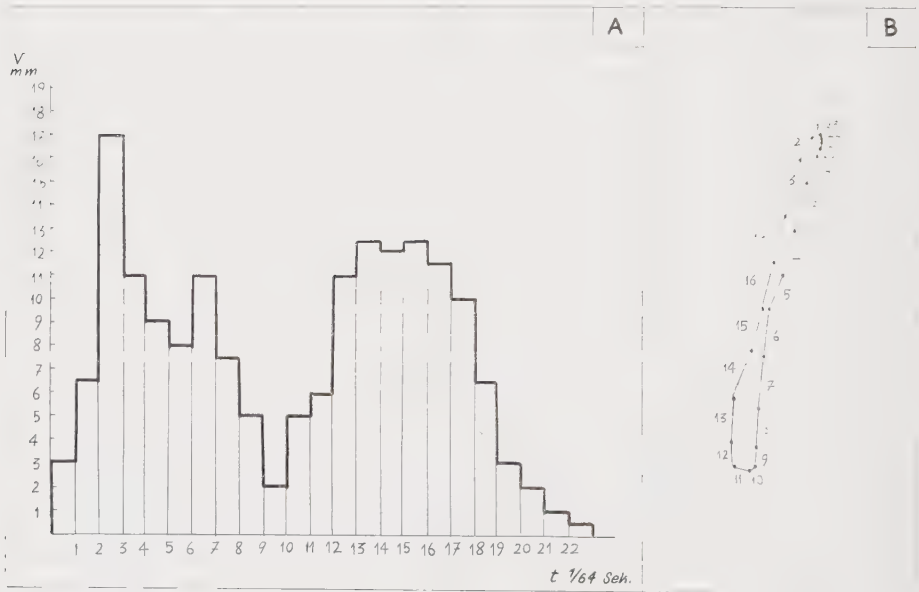


Abb. 7: Projektion einer Kaubahn auf die Frontalebene (B) und entsprechendes Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm (A)

Welche *Fehlerquellen* können bei der Auswertung des Filmes auftreten und welchen Einfluss werden sie auf die Kurve $v = f(t)$ ausüben?

1) Jede Wiedergabe eines Bildes mit einem Projektionsapparat bewirkt eine Vergrößerung der Aufnahmen, die dem Abstand des Projektionsapparates zur Projektionsebene direkt proportional ist (Abb. 8 A). Bei unveränderlichem Abstand erfährt jeder Strich die gleiche Längenausdehnung. Wir stossen also hier wiederum auf einen konstanten Vergrößerungsfaktor, über dessen Bedeutung bereits ausführlich gesprochen wurde. Auf den Verlauf der Bewegungskurve wirkt sich dieser Umstand weiter nicht fälschend aus.

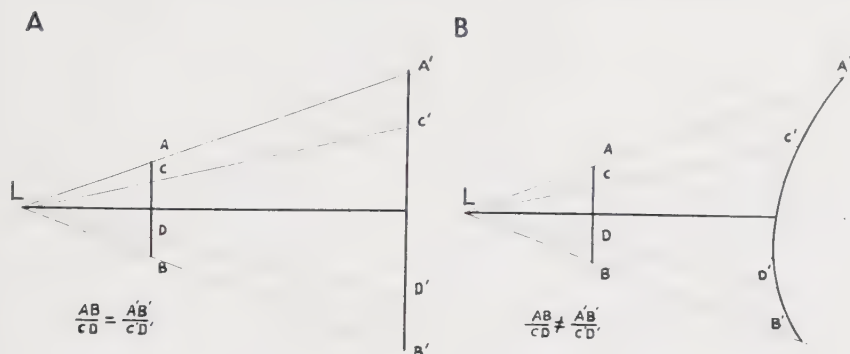


Abb. 8: Sphärische Aberrationen bei der Projektion auf eine gekrümmte Fläche

2) Sphärische Aberrationen (Abb. 8 B) wurden durch die korrekte Lage der dicken Kartonblätter, die flach an einer starren vertikalen Unterlage auflagen, ausgeschlossen.

3) Eine schwerwiegendere Fehlermöglichkeit war durch die gezwungenermassen subjektive Einschätzung des Äquators der Lichtpunkte gegeben. Unsere Bleistiftmarkierung konnte dadurch gegenüber dem geometrisch richtigen rechten äussersten Äquatorpunkt, in senkrechter oder waagrechter Richtung etwas verschoben sein. (Abb. 9 B).

Um uns von dieser akzidentellen Fehlerquelle in den zwei Hauptdimensionen der Aufnahmeebene eine quantitative Vorstellung zu machen, wurde folgender Vorversuch gemacht. Auf dem vertikalen, planen Registrierkarton wurde ein Koordinatensystem mit je 10 mm Abstand der Abszissen und Ordinaten aufgezeichnet. Reihenweise wurde nun in jedes Quadrat der gleiche Lichtpunkt projiziert und markiert. Durch die parallele Anordnung der Achsen hätte somit

jede Marke den konstanten Abstand von 10 mm gegenüber der nächstgelegenen aufweisen müssen. Wegen der oben genannten Fehlerquelle waren aber die Abstände zwischen den Lichtpunkten im-

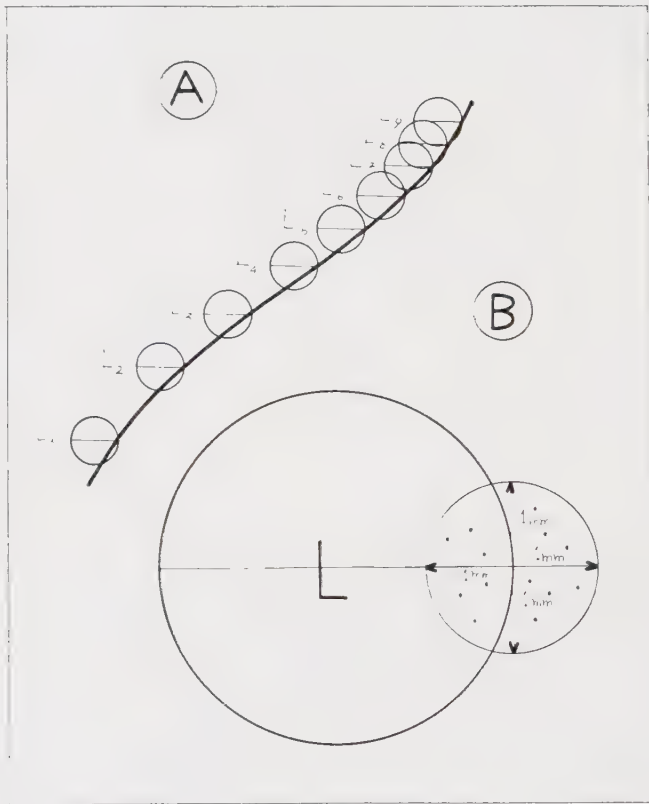


Abb. 9: Markierung der Lichtpunkte (A) und Entfernung des geometrisch richtigen äussersten Aequatorpunktes vom manuell markierten Aequatorpunkt (B)

mer um einen kleinen Betrag grösser oder kleiner als die effektive Entfernung der Koordinaten. Die maximalen Ausschläge der gemessenen Werte wurden als Streubreite um den Mittelwert angenommen. (Abb. 10)

Nach unseren Messungen war diese Streubreite in vertikaler und horizontaler Richtung der Blattebene die gleiche (1 mm). Der effektive Aequatorpunkt befand sich also immer innerhalb eines

Kreises von 1 mm Durchmesser (Abb. 9 B), der den manuell markierten äusseren Äquatorpunkt als Zentrum hat (Geometrisches Mittel der Fehler).

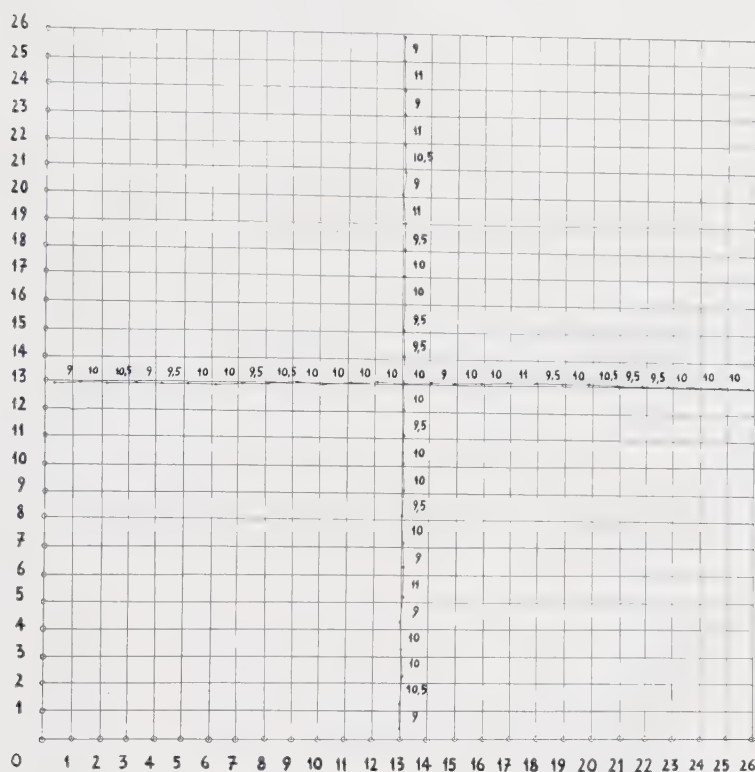


Abb. 10: Zur Fehlerberechnung angewandtes Gitter, mit eingezeichneten Lichtpunktmarkierungen und ihren Abständen (in mm) in waagrechter und senkrechter Richtung

Die Striche, die die einzelnen Markierungspunkte der Kaubahnen verbinden, erhielten dadurch einen angenäherten Wert von $v = \pm 2$ mm, da sich die Fehlerbreiten der einzelnen Punkte bei der Messung ihres Abstandes summierten. Die Kurve, die wir in Abb. 7A aufzeichneten, sollte also bei Einberechnung der möglichen Messfehler nicht als feiner Strich, sondern als Band auftreten, dessen Breite vier Einheiten beträgt.

Die vorangehende Fehlerberechnung war deswegen zweckmässig, weil dadurch die markierte, eckige Kurve (Abb. 7 A) in einen breiteren Streifen umgewandelt werden konnte. Die Extrapolation, d. h. die Verbindung der erhaltenen v -Werte durch eine kontinuierlich verlaufende Kurve, wird dadurch bedeutend erleichtert und viel genauer.

3. Geschwindigkeitsanalyse der registrierten Kaubahnen

Die Geschwindigkeit v der Kaubewegung 1 in Abhängigkeit des Zeitintervalls t ($1/64$) zeigen die Abb. 11, 12, 13. Es sei zusätzlich noch betont, dass v eine rein numerische Grösse ist, und keinen vektoriellen Charakter hat. Für jeden gemessenen t -Wert kennen wir aber den entsprechenden Weg-Punkt P der ursprünglichen Kaubahn. Es ist

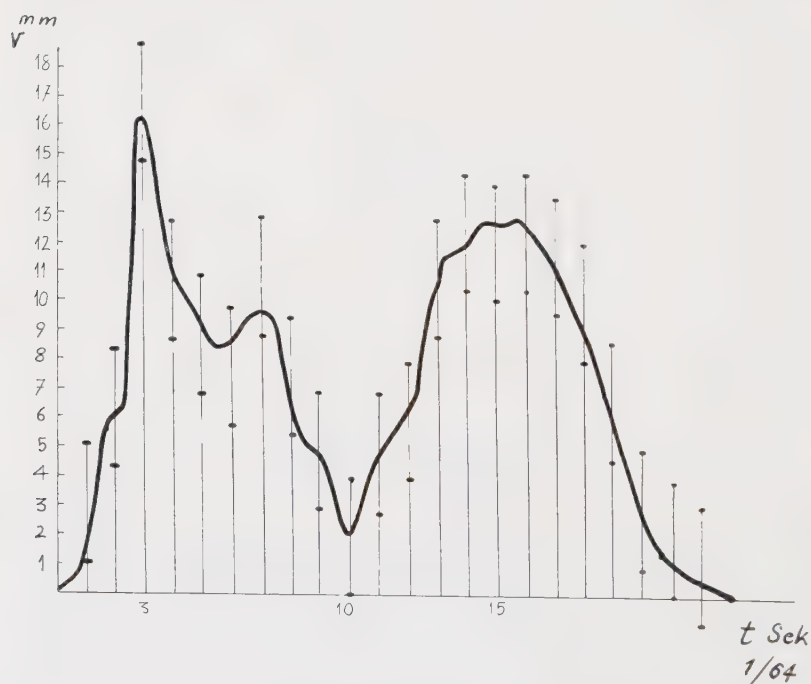


Abb. 11: Durch Extrapolation erhaltene Geschwindigkeitskurve bei Projektion der Kaubahn auf die Frontalebene

also leicht, die Gerade, die zur Kaubahnkurve im Punkt P tangential verläuft, aufzuzeichnen, um damit die Verlaufsrichtung vom Vektor v darzustellen.

Die Bewegung ist physikalisch definiert, wenn man nicht nur für die gemessenen t -Werte, sondern für jeden beliebigen Zeitpunkt t , den entsprechenden Wegpunkt auf der Kaubahn festlegen kann. Dazu sollte man die extrapolierte Kurve $v=f(t)$ integrieren und mit der erhaltenen Funktion $s = \int v(t) dt$ die zurückgelegte Wegstrecke s ausrechnen. Das ist aber für vorliegende Zwecke nicht notwendig, da eine genügende Anzahl Messungen gemacht wurde, um die funktionell wichtigsten Partien einer Kaubahn sicher erfassen zu können.

Betreffend den Verlauf der *Geschwindigkeitskurve in der Frontalebene* wurden folgende allgemeine Beobachtungen gemacht:

Nach einem ziemlich steilen Anstieg der Geschwindigkeit erreicht diese ein erstes Maximum bei $t=3$; hernach nimmt v allmählich ab, um bei $t=10$ ein Minimum zu erreichen. Eine weitere Zunahme bringt uns bei $t=15$ zu einem neuen Höhepunkt, der aber etwas niedriger ist als der vorhergehende. Die Kurve nähert sich dann langsam der t -Achse, um sie bei $t=23$ ganz zu erreichen. Der

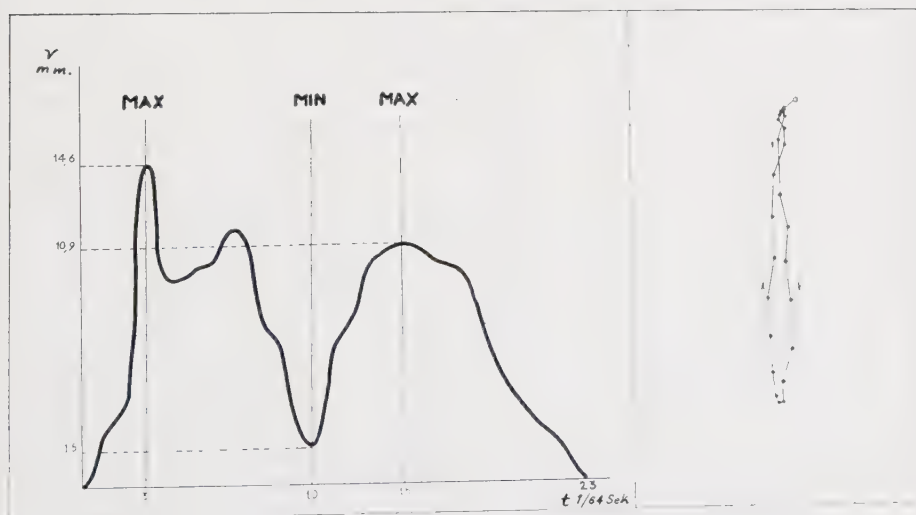


Abb. 12: Projektion der Kaubahn auf die Sagittalebene und entsprechende Geschwindigkeitskurve

Geschwindigkeitsablauf bei der Projektion der Kaubahn auf die *Sagittalebene* zeigt in grossen Zügen dasselbe Bild. Wir haben auch hier neben zwei Maxima bei $t=3$ und $t=15$ ein Minimum bei $t=10$. (Abb. 12)

Bei der Projektion auf die *Horizontalebene* verläuft die Kurve allgemein etwas flacher. Man kann aber auch zwei Maximalwerte und einen Minimalwert feststellen, wobei der Minimalwert demjenigen auf den Frontal- und Sagittalprojektionen entspricht. (Abb. 13)

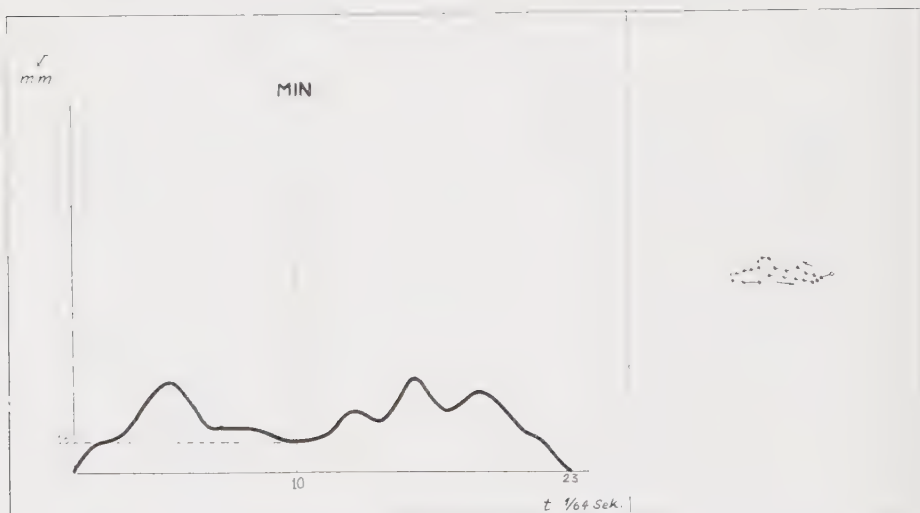


Abb. 13: Projektion der Kaubahn auf die Horizontalebene und entsprechende Geschwindigkeitskurve

Was für Schlüsse lassen sich aus diesen Beobachtungen ziehen? Die Reihenfolge von Maxima und Minima deutet erstens auf einen periodischen Charakter im Geschwindigkeitsablauf $v=f(t)$. Wenn wir die entsprechenden Stellen auf den Kaubahnen festhalten, so sehen wir, dass die beiden Maxima je im ersten Drittel der Oeffnungs- und Schliessbewegung auftreten, und der Minimalwert in dem Moment erreicht wird, in dem die Oeffnungs- in die Schliessbewegung übergeht. Die Schliessbewegung nimmt $\frac{3}{64}$ Sek. mehr Zeit wie die Oeffnungsbewegung in Anspruch, und zwar läuft das letzte Drittel der Schliessbewegung am langsamsten ab. Es bleibt noch die Verschiedenheit des Ablaufs in der Geschwindigkeitskurve, welche

die Projektion auf die Horizontalebene wiedergibt, zu erklären. (Abb. 13). Es ist hierzu nötig, sich den Verlauf der Kaubahn in der Projektion auf die horizontale Ebene vorzustellen. Wie aus Abb. 14 ersichtlich, ist $AB' = AB \cos \alpha$. Bei $\alpha = 0$ ist $\cos \alpha = 1$, um bei $\alpha = \frac{\pi}{2}$ den Nullwert zu erreichen. Die Projektion eines Kaubahnanteiles auf die Horizontalebene wird am grössten sein, wenn α am kleinsten ist, was z. B. an der Uebergangsschleife der Oeffnungs- in die Schliessungsbewegung geschieht. Obwohl die Frontal- und Sagittalbewegung dort am langsamsten erfolgt, kann diese Verlangsamung infolge der gleichzeitig stattfindenden, starken Richtungsänderung, auf der horizontalen Aufnahme nicht genügend deutlich zur Darstellung kommen.

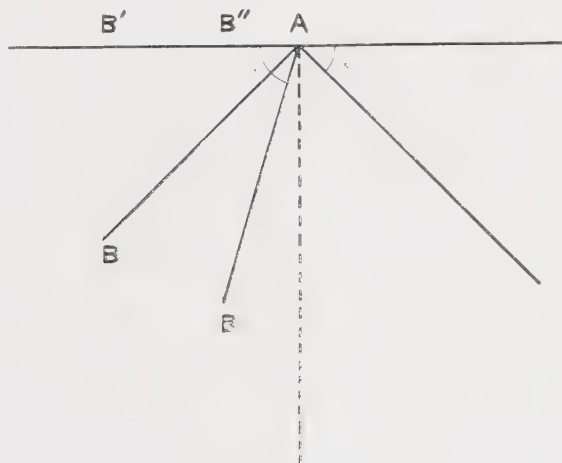
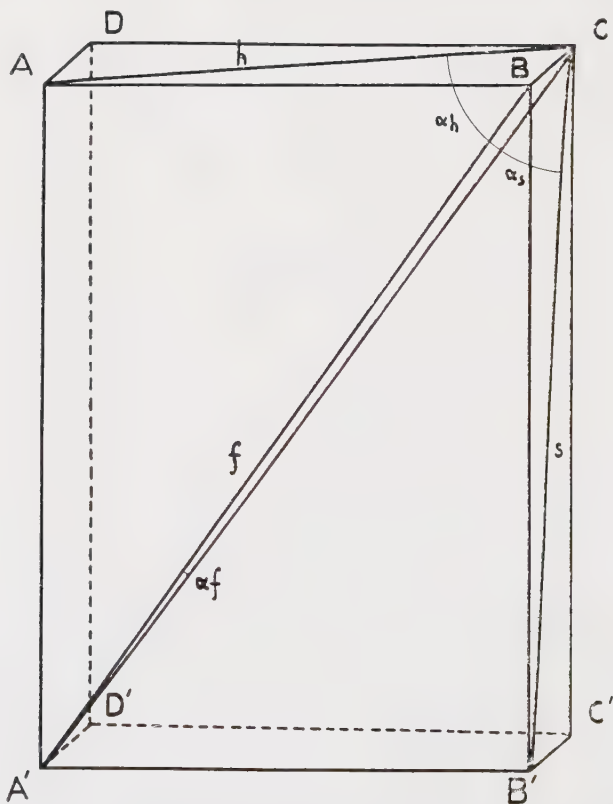


Abb. 14: Die Verzerrung eines Kaubahnanteiles (AB) ist von seiner Neigung zur Projektionsebene abhängig

Dies erklärt den monotonen Verlauf der Geschwindigkeitskurven in den horizontalen Projektionen. Die Geschwindigkeitsausschläge deuten eher auf eine erfolgte Richtungsänderung hin, ohne aber sichere Rückschlüsse auf eine in Wirklichkeit stattgefundenen Geschwindigkeitsänderung zu erlauben. Die horizontale Kurve kann keinen vollständigen Aufschluss über den Gesamtverlauf der Bewegung geben, hingegen erlaubt sie eine genaue Analyse des Teilstücks, in welchem die Umkehr der Oeffnungs- in die Schliessbewegung erfolgt. Jede Flächenprojektion einer in Wirklichkeit drei-

Um das Verhalten des Bewegungsablaufes gegenüber den drei Projektionsebenen zu veranschaulichen, wurde in Abb. 15 der Raumanteil dargestellt, in dem sich eine Kaubewegung abspielt. Die



26

Höhe AA' der geometrischen Figur entspricht dem vertikalen Durchmesser einer Kaubahn, die Länge AB und die Tiefe BC dem horizontalen Durchmesser derselben in der frontalen und sagittalen Projektion. Da die Kaubewegung die grössten Ausmasse in vertikaler und frontaler Richtung aufweist, ist die Tiefe der Raumfigur gegenüber den anderen beiden Raumdimensionen praktisch ohne Bedeutung. Es werden also auf der frontalen und sagittalen Projektionsebene während der Oeffnungs- und Schliessungsphase die kleinsten Verzerrungen erfolgen. Das ist ohne weiteres ersichtlich, wenn mit dem Segment $A'C$ die mittlere Raumlage einer Kaubahnstrecke bei der Oeffnungs- und Schliessungsbewegung dargestellt wird.

Es ist $AA' > AB > BC$ und $\alpha_h > \alpha_s > \alpha_f$,

da $AC = A'C \cos \alpha_h$ $B'C = A'C \cos \alpha_s$ $A'B = A'C \cos \alpha_f$

$A'C > A'B > B'C > AC$

Damit ist bewiesen, dass die durchschnittlichen Verzerrungen auf der Frontalebene am geringsten, auf der Sagittalebene mittelgross und auf der Horizontalebene am grössten sind. Der kritische Punkt auf den beiden vertikalen Projektionen befindet sich bei der Umkehrschleife. Da diese auf der Horizontalebene genauer erfassbar ist, besteht aber die Möglichkeit, diese kritischen Punkte auf der Kurve in der horizontalen Ebene nachzuprüfen und zu vergleichen.

4. Die untersuchten Fälle

Als Versuchspersonen wurden solche mit vollständiger Bezahlung und mit durchschnittlich normalen Bissverhältnissen gewählt.

Fall 1. Patient E. P. 24-jährig. Neutrale Okklusion mit einem vertikalen Ueberbiss von 4 mm und einem horizontalen Ueberbiss von 1 mm. Beide Kiefer waren vollbezahnt mit Ausnahme der unteren Weisheitszähne, die beide congenital fehlten. (Abb. 16)

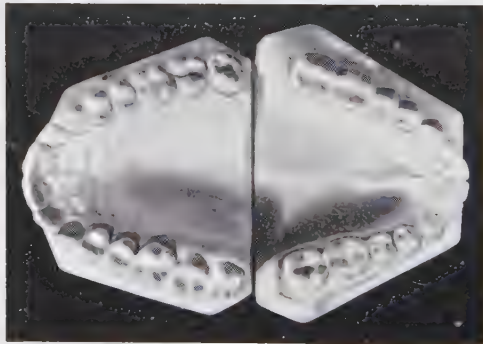
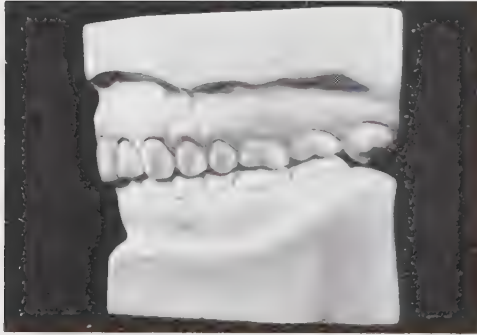
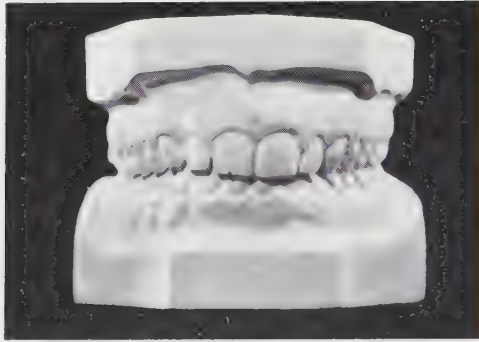


Abb. 16: Versuchsperson E. P. Modelle des Gebisses in Frontansicht.
Seitenansicht r. u. l., Aufsicht

Fall 2. Patient U. F. 22-jährig. Normalbiss, der in der Front eine leichte Tendenz zum offenen Biss aufweist. Vertikaler Ueberbiss: 2 mm. Horizontaler Ueberbiss: 2 mm. Sämtliche Zähne in normaler Okklusion vorhanden. (Abb. 17)

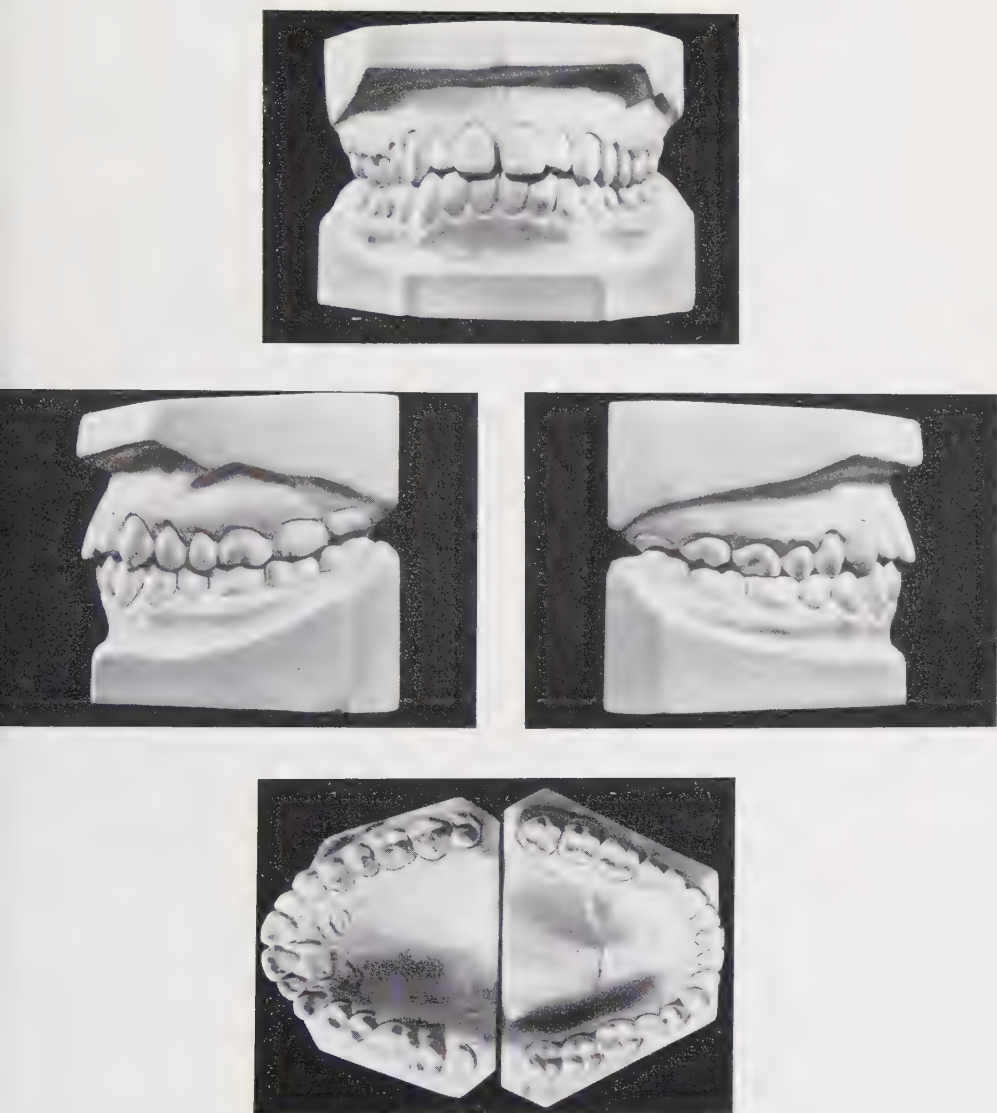
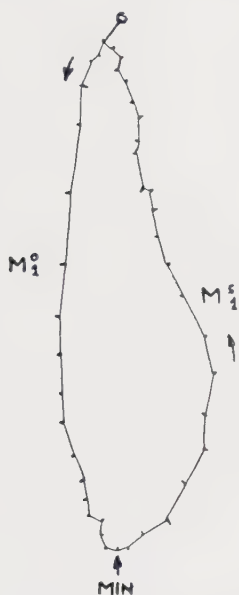


Abb. 17: Versuchsperson U. F., Gebissmodelle in Frontansicht
Seitenansicht r. u. l. Aufsicht

5. Versuchsergebnisse

Nachdem der Prototyp einer Kaubahn mit Geschwindigkeitsanalyse (Abb. 7, 12, 13) eingehend beschrieben wurde, werden im folgenden weitere 11 der insgesamt 29 analysierten Kaubahnen dargestellt, wobei auf die Werte der charakteristischen Partien näher eingegangen wird. Zu diesem Zwecke wird jeder Beschreibung der Verlauf der Kaubahn in der Frontalebene beigefügt, so dass man die entsprechenden Punkte unmittelbar vergleichen kann. Jede Kaubahn ist durch die Umkehrschleife in zwei Perioden aufgeteilt. Die Maxima (Max), die während der Schliessbewegung auftreten, werden mit M^s bezeichnet, in der Oeffnungsphase dagegen mit M^o . Die untere Ordnungszahl 1, 2, ... n gibt die Reihenfolge der Maximalwerte an; so wird z. B. M^s_2 den zweiten Maximalwert während der Schliessperiode darstellen. Min bezeichnet die Minimalwerte, T_o u. T_s die Dauer der Oeffnungs- oder Schliessungsperiode, und T die Gesamtdauer der einzelnen Kaubewegung.

Abb. 18: Kaubahn No. 2. Frontalebene



$M_1^o = 13$	$t = 6$
$MIN = 2$	$t = 18$
$M_1^s = 9$	$t = 27$

Sagittalebene		
$M_1^o = 12,5$	$t = 4$	
$MIN = 1$	$t = 18$	
$M_2^s = 7$	$t = 24$	

Horizontalebene		
Bei	$t = 18$	$v = 1$

$To = 18$
$Ts = 23$
$T = 41$

Abb. 19: Kaubahn No. 3, Frontalebene

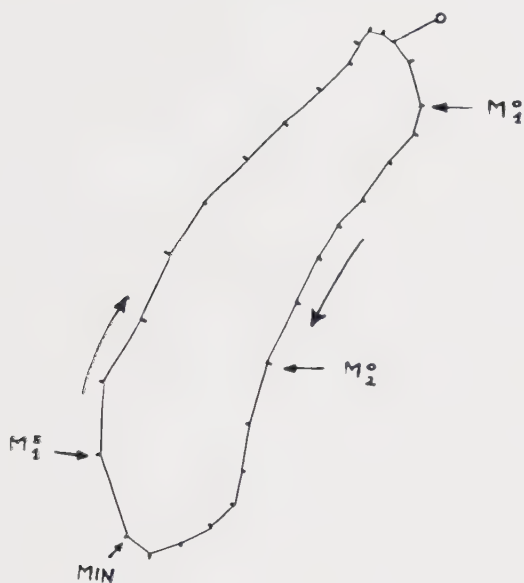


$$\begin{array}{ll}
 M_1^0 = 10 & t = 2 \\
 MIN = 2,5 & t = 15 \\
 M_1^S = 12 & t = 19
 \end{array}$$

Sagittalebene		Horizontalebene	
$M_1^0 = 10,5$	$t = 2$	Bei $t = 15$	$v = 4$
$MIN = 1$	$t = 25$		
$M_1^S = 11$	$t = 19$		

$$\begin{array}{l}
 T_o = 15 \\
 T_s = 14 \\
 T = 29
 \end{array}$$

Abb. 20: Kaubahn No. 4. Frontalebene

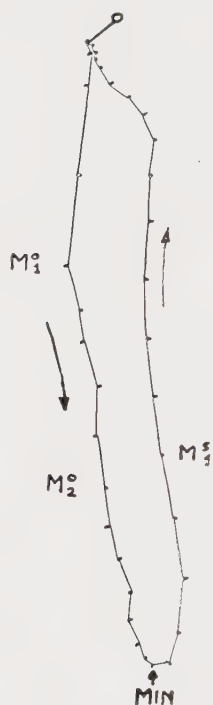


M_1^O	$=$	8,5	$t =$	2
M_2^O	$=$	12	$t =$	9
MIN	$=$	6	$t =$	15
M_1^S	$=$	16	$t =$	17

Sagittalebene			Horizontalebene		
M_1^O	8	$t =$ 2	Bei	$t =$ 15	$v =$ 6
M_2^O	- 12	$t =$ 10			
MIN	- 3	$t =$ 15			
M_1^S	- 16	$t =$ 17			

T_o	15
T_s	14
T	29

Abb. 21: Kaubahn No. 5, Frontalebene

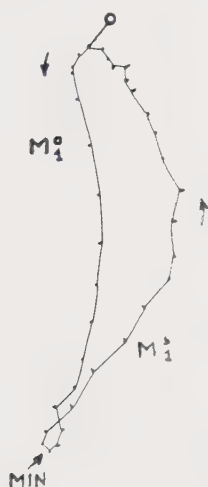


M_1^0	$= 17$	$t = 4$
M_2^0	$= 10$	$t = 9$
MIN	$= 1,5$	$t = 16$
M_1^s	$= 11,5$	$t = 21$

Sagittalebene			Horizontalebene	
M_1^0	$= 18$	$t = 4$	Bei $t = 16$	$v_{\text{max}} = 2$
M_2^0	$= 9$	$t = 9$		
MIN	$= 1$	$t = 16$		
M_1^s	$= 10$	$t = 21$		

$T_0 = 16$
 $T_s = 19$
 $T = 35$

Abb. 22: Kaubahn No. 6, Frontalebene



$$\begin{array}{ll} M_1^0 = 9 & t = 5 \\ MIN = 1 & t = 15 \\ M_1^s = 8,5 & t = 20 \end{array}$$

Sagittalebene

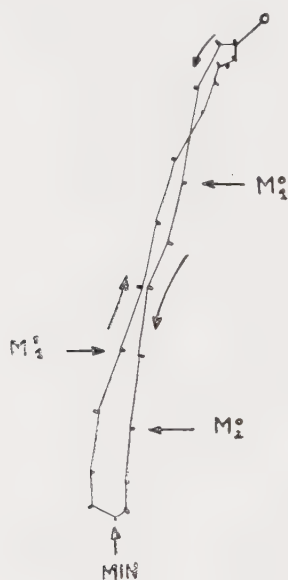
$$\begin{array}{ll} M_1^0 = 9 & t = 6 \\ MIN = 1 & t = 15 \\ M_1^s = 8,5 & t = 20 \end{array}$$

Horizontalebene

Bei $t = 16$ $v = 1$

$$\begin{array}{l} T_o = 15 \\ T_s = 20 \\ T = 35 \end{array}$$

Abb. 23: Kaubahn No. 7, Frontalebene



M_1^0	$= 17$	$t = 3$
M_2^0	$= 11$	$t = 7$
MIN	$= 2$	$t = 10$
M_1^s	$= 12,5$	$t = 14$

Sagittalebene		Horizontalebene	
M_1^0	$= 16$	Bei $t = 10$	$v = 2$
M_2^0	$= 14$		
MIN	$= 1$		
M_1^s	$= 11$		

T_0	$= 10$
T_s	$= 12$
T	$= 22$

Abb. 24: Kaubahn No. 8. Frontalebene



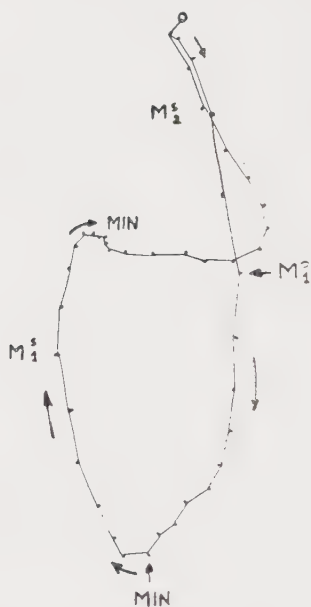
$$\begin{array}{ll} M_1^o = 16 & t = 3 \\ MIN = 1 & t = 10 \\ M_1^s = 13 & t = 15 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Sagittalebene} & \\ M_1^o = 15 & t = 3 \\ MIN = 1 & t = 11 \\ M_1^s = 12 & t = 15 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Horizontalebene} & \\ \text{Bei } t = 10 & v = 1 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} T_o = 10 \\ T_s = 16 \\ T = 26 \end{array}$$

Abb. 25: Kaubahn No. 9, Frontalebene



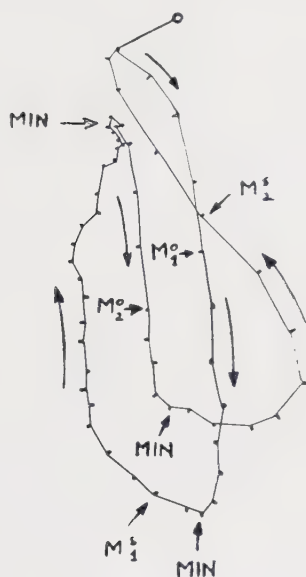
M_1^0	15	t	5
MIN	= 3	t	14
M_1^s	10	t	= 20
MIN	0,5	t	= 27
M_2^s	9	t	= 40

Sagittalebene		
M_1^0	15	$t = 5$
MIN	= 2	$t = 15$
M_1^s	= 8,5	$t = 19$
MIN	= 0,5	$t = 27$
M_2^s	= 10	$t = 37$

Horizontalebene		
Bei	$t = 14$	$v = 3$
Bei	$t = 27$	$v = 1,5$

T_0	14
T_s	= 28
T	12

Abb. 26: Kaubahn No. 10, Frontalebene

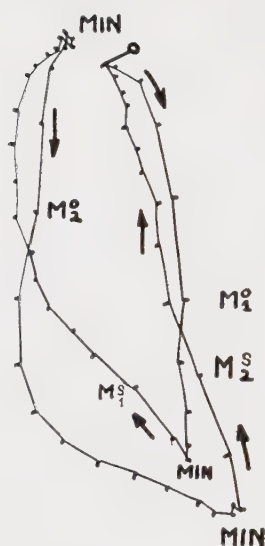


$M_1^0 = 13$	$t = 4$
$MIN = 3$	$t = 11$
$M_1^s = 7$	$t = 13$
$MIN = 0,5$	$t = 38$
$M_2^0 = 11$	$t = 42$
$MIN = 3,5$	$t = 47$
$M_2^s = 14,5$	$t = 56$

Sagittalebene			Horizontalebene		
$M_1^0 = 13,5$	$t = 4$		Bei $t = 11$	$v = 2,5$	
$MIN = 2$	$t = 11$		Bei $t = 38$	$v = 1$	
$M_1^s = 8$	$t = 20$		Bei $t = 47$	$v = 3$	
$MIN = 0,5$	$t = 37$				
$M_2^0 = 7,5$	$t = 40$				
$MIN = 1$	$t = 48$				
$M_2^s = 13$	$t = 55$				

T	11
T	9
T	28
T	10
T	58

Abb. 27: Kaubahn No. 11. Frontalebene



M_1^0	≈ 19	t	≈ 5
MIN	≈ 3	t	≈ 9
M_1^s	≈ 12	t	≈ 11
MIN	≈ 4	t	≈ 27
M_2^0	≈ 17	t	≈ 32
MIN	≈ 2	t	≈ 43
M_2^s	$\approx 15,5$	t	≈ 46

Sagittalebene		Horizontalebene	
M_1^0	≈ 20	Bei $t \approx 9$	$v \approx 3$
MIN	≈ 2	Bei $t \approx 27$	$v \approx 3,5$
M_1^s	$\approx 10,5$	Bei $t \approx 43$	$v \approx 2$
MIN	$\approx 0,5$		
M_2^0	$\approx 17,5$		
MIN	≈ 1		
M_2^s	≈ 16		

T	≈ 9
T	≈ 18
T	≈ 16
T	≈ 13
T	≈ 56

6. Auswertung der Ergebnisse

Die erhaltenen Resultate kritisch sichtigend, und von der Feststellung ausgehend, dass alle aufgenommenen Kaubahnen einen ähnlichen Geschwindigkeitsablauf aufweisen, wurde in Abb. 29 versucht, ein Gesamtbild der untersuchten Bewegungsabläufe aufzuzeichnen, um damit eine plastische Vorstellung zu erleichtern.

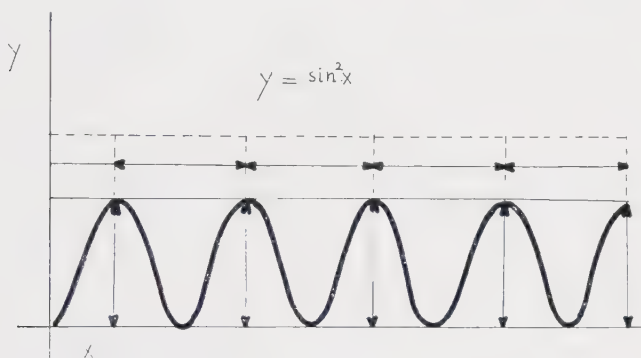


Abb. 28: Grund-Typ einer Geschwindigkeitskurve

Man kann annehmen, dass die Geschwindigkeitskurven $v=f(t)$ dadurch entstehen, dass die einfachere Kurve der Abb. 28 in der Höhen- und Längsrichtung ausgedehnt wird. Da sich nun diese Kurve, in der wir die y -Werte immer positiv angenommen haben, formelmässig durch die trigonometrische Funktion

$$1) \ y = \sin^2 x$$

ausdrücken lässt, ist es möglich, die senkrechten und waagrechten Schwankungen der Geschwindigkeitskurven durch zwei variable Faktoren a und b darzustellen.

$$v = a \cdot \sin^2 b \cdot t$$

Die vertikalen Ausschläge des Prototyps der Geschwindigkeitskurve (Abb. 28) sind durch a bestimmt. Die Höchst- und Tiefstpunkte der a -Werte müssen sich also in einem Koordinatensystem so verteilen wie die Maxima und Minima der im Laufe dieser Arbeit analysierten Geschwindigkeitskurven. Wenn $a=f(t)$ mit einer geeigneten Länge der Einheitssegmente aufgezeichnet wird, so ist es möglich, das gegenseitige Verhalten der charakteristischen Stellen

der aufgenommenen Kaubahnen auf einem einzigen Schema darzustellen. Das bringt den Vorteil mit sich, dass die Verteilung der charakteristischen Partien innerhalb der Oeffnungs- und Schliessungsperioden und ihre Grössenverhältnisse mit einem einzigen Blick erfasst werden können (Abb. 29).

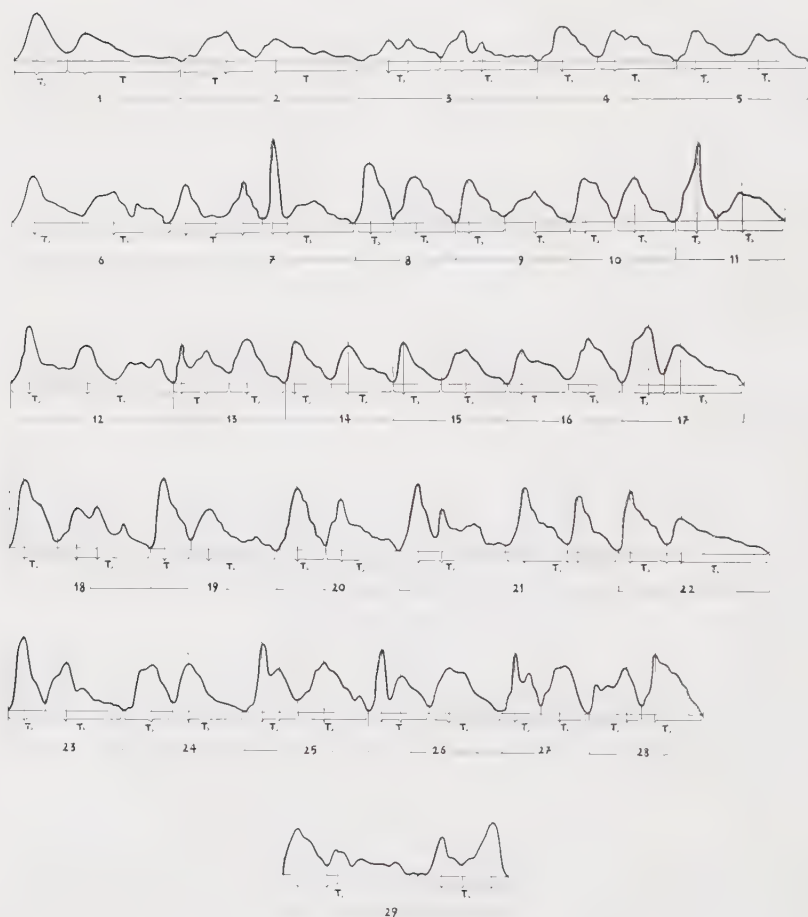


Abb. 29: Gesamtdarstellung der untersuchten Geschwindigkeitsabläufe

Ganz ähnlich kann man bei der Darstellung von b vorgehen, durch welchen Faktor die zeitliche Länge der einzelnen Oeffnungs-

und Schliessungsperioden bestimmt wird; sein Verhalten ist auf der Darstellung in Abb. 30 genauer erfassbar.

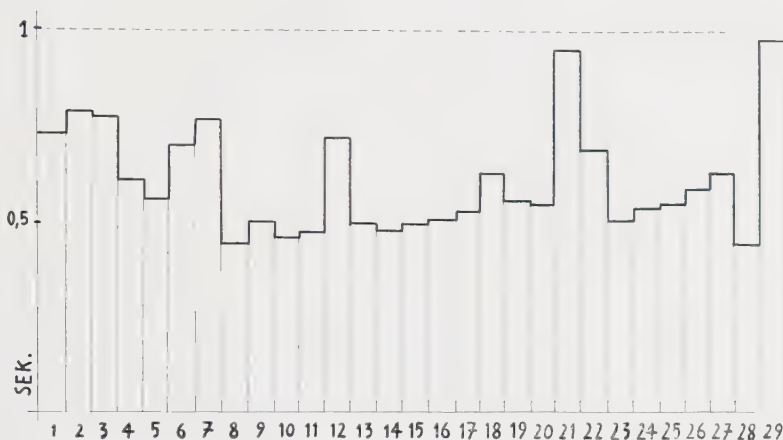


Abb. 30: Dauer der untersuchten Kaubewegungen

Die verschiedenen Werte von a und b sind im zeitlichen Verlauf der Bewegungen nicht mit mathematischer Genauigkeit vorauszu-
sehen; man kann sie wohl als graphisch fassbare Funktionen von t
darstellen, aber erst dann, wenn die entsprechende Bewegung ihren
Werdegang auf unseren Registrierapparaten schon niedergeschrieben
hat. In diesen beiden Werten ist eigentlich das Individuelle und Ein-
zigartige und Einmalige jeder vitalen Aeusserung verankert, und sie
stellen den Uebergang dar zwischen der physikalisch messbaren Seite
der Funktion eines lebenden Organismus und seiner biologischen
Eigenart. Durch die Einführung dieser zwei Faktoren in unsere For-
meln ist es aber möglich, wenigstens formell die Kluft, die zwischen
Rhythmus und Periodizität besteht, einigermaßen zu überbrücken.

Aus den Ergebnissen unserer Versuche können folgende Rück-
schlüsse gezogen werden:

1. Während einer Kaubewegung wird der Geschwindigkeitsab-
lauf eines Unterkieferpunktes in seinem funktionellen Zusammen-
hang mit der Zeit durch eine fortlaufende Kurve dargestellt, die
keine zackige und unregelmässig eintretende Höhenunterschiede auf-
weist; die Zu- und Abnahme der Geschwindigkeit erfolgt also stets
allmählich. Diese Beobachtung bestätigt frühere Feststellungen der

Arbeitsphysiologie, dass sich die aktiven Bewegungen von Körperteilen zeitlich nie abrupt abspielen, auch dann nicht, wenn bruske Richtungsänderungen auftreten.

Ein eindrückliches Beispiel hierfür haben wir z. B. in der Bogenführung bei Streichinstrumenten (Dolder), wobei der Uebergang vom Ab- zum Aufstrich immer schleifenförmig und mit graduell verschieden einsetzender Beschleunigung stattfindet.

2. Alle Kaubewegungen weisen eine Anzahl von Minima und Maxima der Geschwindigkeit auf, die sich regelmässig ablösen. Die Maxima befinden sich in der Regel im ersten Drittel der Oeffnungsbewegung und am Anfang oder in der Mitte der Schliessbewegung. Die Minima liegen immer in der Umkehrschleife der Kaubahn, bei komplizierteren Bewegungsformen auch an den Stellen, bei denen starke Richtungsänderungen eintreten (Bewegungen 12, 21, 29 der Abb. 29, die den Kaubahnen No. 9, 10, 11 entsprechen).

3. Die Schliessperiode ($3/5 T$) dauert im allgemeinen zeitlich länger als die Oeffnungsperiode ($2/5 T$). Die effektive Dauer der beiden Perioden, sowie die Maximal- und Minimalwerte sind gewissen Schwankungen unterworfen, die sich durch die individuelle Verschiedenheit des Bewegungsrhythmus der Versuchspersonen und die während des Kauaktes wechselnde Nahrungskonsistenz erklären lassen. Wegstrecke: Die obere (Schliessung—Oeffnung) und die untere Umkehrschleife (Oeffnung—Schliessung) betragen streckenmässig je ca. 20% der Gesamtlänge einer Kaubahn. Die restliche Wegstrecke (96%) wird durch die Oeffnungs- oder Schliessbewegung beansprucht.

In zeitlicher Hinsicht sind die Verhältnisse grundverschieden: Die untere Umkehrschleife nimmt dabei 10% der zeitlichen Dauer einer Kaubahn in Anspruch, und die obere 20%. Für Oeffnung und Schliessung bleiben also zeitlich nur 70% der Bewegungsdauer zur Verfügung.

Diese Resultate sind schon bei der Betrachtung einer durchschnittlichen Geschwindigkeitskurve vorauszusehen (Abb. 11).

4. Die Oberfläche der durch die Kurve und der Ordinatenachse begrenzten Figur entspricht dem gesamthaft zurückgelegten Wege. Die Strecken, die durch die Uebergangsschleifen in Anspruch genommen werden, entsprechen dagegen den Oberflächen der Teil-

figuren, die unten durch die Ordinatenachse und oben durch die Geschwindigkeitskurve bei den beiden Schleifen begrenzt sind. Das Verhältnis Gesamtweg—Schleifen gleicht also dem Oberflächenverhältnis Gesamtfigur—Teilfiguren. Der zeitliche Bewegungsablauf ist dagegen aus einer einzigen Linie, der Ordinatenachse, herauszulesen. Das Verhältnis Umkehrdauer—Gesamtdauer ist also linear.

Man braucht nur zu bedenken, dass sich die Oberfläche eines Viereckes bei Halbierung einer Seite zu einem Viertel reduziert, um zu verstehen, dass die prozentualen Wegstrecken viel kleiner sein müssen als die entsprechenden Prozentanteile der Bewegungsdauer.

Nach dieser eingehenden Analyse der Geschwindigkeitsverhältnisse ist noch auf die Zu- und Abnahme der Geschwindigkeit, d. h. auf die *Beschleunigung* einzutreten.

Der Wert der Momentanbeschleunigung, die wir mit a bezeichnen werden, ist bekanntlich durch die erste Ableitung von $v=f(t)$ gegeben.

Es ist also

$$a = \frac{dv}{dt} = f'(t)$$

Für jeden Punkt t_n von $v=f(t)$ gilt nun die Gleichung $\frac{dv}{dt} = \tan \alpha$, wobei α den Winkel angibt, der von der t -Achse und von der Geraden, die der v -Kurve in t_n tangential verläuft, begrenzt ist. Bei den Hoch- und Tiefpunkten unserer Kurve ist nun $\alpha=0$ (Abb. 31), die Momentanbeschleunigung also gleich Null, da $\tan 0 = \frac{0}{1} = 0$. Es ist aber zu bedenken, dass die Werte, die man auf diese Weise bekommt, nur die Projektion der Beschleunigung a auf die Kaubahn darstellen. Da die Nullwerte für a dort auftreten, wo die Richtungsänderung am grössten ist, so wird $\overline{a}$ (vektorielle Grösse) dort keineswegs gleich Null sein, sondern lediglich so gerichtet sein, dass sich ihre Projektion auf der entsprechenden Kaubahn zu einem Punkt reduziert, derselben gegenüber also senkrecht gelegen ist. Die Bedeutung dieser Feststellungen wird deutlich, wenn wir bedenken, dass dem Grundgesetz der Dynamik gemäss

$$F = \overline{a}M$$

ist, wobei in unserem Falle M die Masse des Unterkiefers darstellt, und F die Resultante der gesamten Muskelkräfte, die auf ihn einwirken.

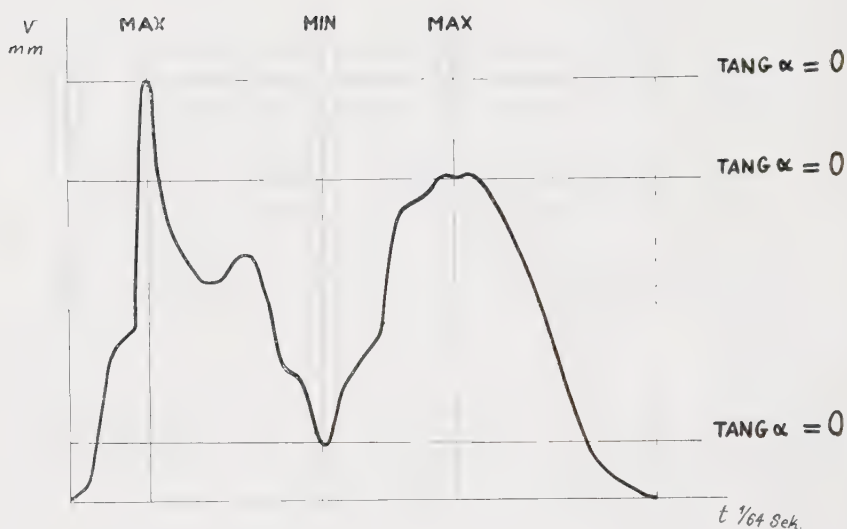


Abb. 31: Die Beschleunigung im Kaubewegungsablauf

Es kann daraus die arbeitsphysiologisch wichtige Tatsache herausgelesen werden:

Wenn die Geschwindigkeit in der Kaubewegung ihre Maximalwerte erreicht, dann erfolgt die Krafteinwirkung der Muskulatur in annähernd senkrechter Richtung zur Kaubahn.

IV. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Der durchschnittliche Geschwindigkeitsablauf einer Kaubewegung gestaltet sich folgendermassen:

Nach einer raschen Zunahme, die im ersten Drittel der Oeffnungsbahn ihr Maximum erreicht, nimmt die Geschwindigkeit allmählich ab, um bei der Umkehrschleife ca. $\frac{1}{5}$ des vorhin erreichten Maximalwertes zu betragen. Zu Beginn der Schliessbewegung erfolgt eine neue Zunahme, das Maximum wird wie bei der Oeffnung im ersten Drittel der Schliessungsbahn erreicht; dessen Wert ist im allgemeinen kleiner als bei der Oeffnungsbewegung (ca. $\frac{3}{4}$), kann hier und da gleich gross (Kaubewegungen 10, 24 der Abb. 29) oder gar grösser sein (Kaubewegungen 3, 13, 16, 28, 29). Die Geschwindigkeit nimmt dann wieder ab, um bei der Uebergangsschleife Schliessung-Oeffnung ihr Minimum zu erreichen.

Ein eigentlicher Stillstand in der Kaubewegung tritt nicht auf, die zurückgelegten Strecken sind aber in den beiden Uebergangsschleifen so klein, dass man in unseren Kurven den Eindruck bekommt, dass die v -Werte die Ordinatenachse tangieren. Am langsamsten verläuft die Kaubewegung vor Beginn der Oeffnungsbahn.

Es ist wohl kein Zufall, dass die Minimalwerte der Geschwindigkeit immer dort auftreten, wo die Kaubahn die grössten Krümmungen aufweist. Man darf eher annehmen, dass sich die Kaubewegung energetisch so abspielt, dass kein unnötiger Kraftverschleiss auftritt. Wenn bei den Umkehrschleifen keine Verlangsamung stattfinden würde, so müsste die Muskulatur eine viel grössere Kraft aufbringen, um die Bewegung in der gegebenen Bahn zu halten, ähnlich wie beim Autofahren, wo man in einer engeren Kurve langsamer fährt als auf einer geraden Strecke. Blicke die Geschwindigkeit konstant, müssten wir mit einem viel grösseren Pneuverschleiss rechnen, da die auftretende Zentrifugalkraft dem Krümmungsradius der Bewegungsbahn umgekehrt proportional ist. Man ist also berechtigt, von einer ökonomischen Koinzidenz von Bewegungsweg und Geschwindigkeit zu sprechen.

Wenn man die Abnahme der Geschwindigkeit bei den Umkehrschleifen nur mit der Bewegungsform der Kaubewegung (Eberhard, Stocker) in einen kausalen Zusammenhang bringen möchte, so könnte man sich immer noch nicht erklären, wieso die Geschwindigkeitswerte, die vor der Oeffnungsbahn auftreten, so entschieden niedriger sind als die entsprechenden Werte vor der Schliessungsbahn, da die beiden Umkehrschleifen ungefähr die gleiche Krümmung aufweisen.

Als neuer wichtiger Faktor tritt aber gegen Ende der Schliessbewegung der Kaudruck in Erscheinung. Nach neueren Untersuchungen (Briner) nimmt er in diesem Kaubahnabschnitt ständig zu, erreicht sein Maximum etwas vor der Oeffnungsphase, um darnach rasch auf einen Nullwert zurückzusinken. Demgegenüber stehen die sehr niedrigen Werte der Geschwindigkeit, die erst nach Aufhören des Kaudruckes wieder rasch zunimmt.

Geschwindigkeits- und Kaudruckablauf verhalten sich also gegensätzlich. Es ist daraus zu entnehmen, dass der Verlust an kinetischer Energie zugunsten des Kaudruckes stattfindet.

Wie man vorhin die Geschwindigkeit mit der Form der Kaubahn und den dadurch auftretenden wechselnden Zentrifugalkräften in Zusammenhang bringen konnte, so stossen wir hier wiederum auf wichtige energetische Wechselbeziehungen mit dem Kaudruck (Briner). Kaubahn, Kaudruck und Geschwindigkeit sind also nicht gesondert beim Kauen auftretende Erscheinungen, sondern verschiedene Aspekte eines einzigen energetischen Geschehens.

Die von der Muskulatur erzeugte Kauenergie erfährt während der Mastikation zyklische Umwandlungen: kinetische Energie, zentripetal gerichtete Kräfte und Kaukräfte lösen sich rhythmisch ab. Die Bahn-, die Druck-, und Geschwindigkeitsverhältnisse, die dabei auftreten, sind wahrscheinlich so gestaltet, dass diese Umwandlungen mit dem grösstmöglichen Nutzeffekt stattfinden können. Es wäre ja auch nicht zu erwarten, dass beim Kauen dieses überall in der Physiologie auftretende Prinzip keine Bestätigung finden würde. Die Beziehungen zwischen Kinematik, Dynamik (Briner) und Form der Kaubahn (Eberhard, Stocker), die vorhin erläutert wurden, scheinen jedenfalls einem oekonomischen Prinzip zu unterstehen.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der Geschwindigkeitsverhältnisse im Ablauf der menschlichen Kaubewegungen. Trotz der Mannigfaltigkeit der Bewegungsformen, die man als Kaubahnen registriert, lassen sich mit Hilfe der Geschwindigkeitsanalyse gewisse Gesetzmässigkeiten im zeitlichen Ablauf feststellen. Die charakteristischen Geschwindigkeitswerte verteilen sich zeitlich und räumlich gemäss einer bestimmten Periodizität, die zwar kleinen Schwankungen unterworfen ist, aber stets die gleichen Merkmale aufweist.

Die rhythmische Grundlage des Kauaktes ist also nicht nur in der blossen Reihenfolge von Oeffnen und Schliessen des Mundes, sondern auch im feineren zeitlichen Ablauf der Kaubewegungen wiederzufinden.

Der Geschwindigkeitsablauf spielt sich nicht unabhängig ab, sondern steht mit den verschiedenen Krümmungen der Kaubahnen und den wechselnden Druckverhältnissen in Beziehung. Diese gegenseitigen Verhältnisse unterstehen als Erscheinungen eines final determinierten Geschehens einem energetischen Oekonomieprinzip, das also auch beim Kauen seine Bestätigung findet.

Es liegt mir sehr daran, Herrn Prof. Dr. E. Dolder für die Ueberlassung des Themas und die tatkräftige Unterstützung der Arbeit meinen verbindlichsten Dank auszusprechen. Des weiteren möchte ich Herrn J. Bissegger bestens danken für seine wertvolle Hilfe im kinematographisch-technischen Teil der Arbeit.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bakker B. R.: Vorträge über die Theorie der Zahnärztlichen Prothetik. *Korr. f. Z.* 54, H. 1, S. 23; H. 2, S. 53, 1930.
- Die «vierte Phase» der Kaubewegungen beim Menschen. *Deutsche Zahn-Mund- und Kieferheilkunde.* 9, 225, 1942.
- Bennet N. G.: Ein Beitrag zum Studium der Bewegungen des Unterkiefers. *Zeitschrift für Orthopädie und Prothese.* 2, 76—95, 1913.
- Beth G.: Beitrag zur Analyse der Vorbissbewegung. Diss. Berlin 1921.
- Briner M.: Kaubewegung und Kaudruck in ihren wechselseitigen Beziehungen. Diss. Zürich 1953.
- Dolder E.: Physiologische Untersuchung der Bogenführung auf Streichinstrumenten. *Z. Schr. f. d. Physiologie d. Mensch. bei Arbeit und Sport.* 5, H. 1, S. 67, 1931.
- Craddock F. W.: Muscles of mastication and mandibular movements. *New Zealand D. J.* 44, 233—239, 1948.
- Eberhard M.: Versuch einer kinematographischen Registrierung der Bewegungen des vollbezahnten menschlichen Unterkiefers beim Kauen. Diss. Zürich 1947.
- Frechette A. R.: Partial denture planning with special reference to stress distribution. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 1, 6, 1951.
- Ganzer H.: Ueber die Bewegungsbahn des Unterkiefers, insbesondere bei den Menschen und bei den Säugetieren. *Sitz. Ber. der Ges. naturf. Freunde.* 7, 1908, *Rf. D. z. W.* 5, 105, 1909.
- Gysi A.: Artikulation. *Handbuch der Z.heilkunde von Ch. Bruhn. J. Bergmann Verlag München* 3, 176, 1926.
- Hess W. R.: Die funktionelle Organisation des vegetativen Nervensystems. Benno Schwabe & Co. Verlag Basel 1948.
- Hildebrand G. Y.: Studies in mandibular kinematics. *Dent. Cosm.* 78, 449—458, 1936.
- Studies in the masticatory movements of the human lower jaw. *Walter de Gruyter & Co. Berlin* 1931.
- Hiltebrandt C.: Die Arbeitsphysiologie des menschlichen Kauorgans. *Werk Verlag Dr. Edmund Banaschewski Bad Wörishofen* 1950.
- Kretschmer E.: *Medizinische Psychologie.* Georg Thieme Verlag Stuttgart 1950.
- Kurth L. E.: Physiology of mandibular movements related to prosthodontia. *N. Y. State D. J.* 15, 323—329, 1949.
- Mandibular movements and articulator occlusion. *J. A. D. A.* 39, 37—46, 1949.
- Jankelson B., Hoffmann G. M., Hendron J. A.: The physiology of the stomatognathic system. *J. A. D. A.* 46, 375, 1953.
- Lubosch W.: Universelle und spezialisierte Kaubewegungen bei Säugetieren. *Biol. Zbl.* 27, 613—652, 1907.

- Milton L.: Revision of accepted dieta on mandibular position. N. Y. J. Dent. 20, 8—14, 1950.
- Münzesheimer F.: Photographische Registrierung der Kieferbewegung und ihre Auswertung. D. z. W. 31, 425, 1933.
- Posselt Ulf: Studies in the mobility of the human mandible. Acta Odontologica Scandinavica, 10, Supplementum 10, 1952.
- Schröder H.: Ueber den Umfang der Mahlbewegung. D. z. W. 43, 709, 1940.
- Schulze H.: Beitrag zur Analyse der Oeffnungs- und Schliessbewegungen an menschlichen Kiefern im bezahnten und zahnlosen Zustande. Diss, Berlin 1920.
- Stocker W.: Untersuchungen über die Kieferbewegungen der Menschen beim Kauen mittels einer photographischen Methode. Diss, Zürich 1952.
- Vest G.: Beitrag zur Zahnbelastung beim Kauakt. Schw. MfZ. 36, 439, 1926.
- Wild W.: Funktionelle Prothetik. Benno Schwabe Verlag Basel 1950.
- Unterkieferbewegungen und Kaubewegungen. Schw. MfZ. 56, 897, 1946.
- Wustrow P.: Zur Darstellung der Kieferbewegungen. Z. R. 38, H. 6, S. 235, H. 10, S. 421, H. 16, S. 680, 1929.
- Zsigmondy O.: Ueber die Bewegungen des Unterkiefers beim Kauakt. Oesterr. Z. f. Stom. 10, H. 6, S. 175—184, 1912.

CURRICULUM VITAE

Als erster Sohn von Dr. Robert Beck und Amarilli geb. Fisch wurde ich am 30. Juni 1928 in Zug geboren. Nach dem Tod meines Vaters begab sich die Familie nach Lugano. Dasselbst besuchte ich die Primarschule, das Ginnasio und das Liceo Cantonale, an dem ich 1947 das Maturitätsexamen bestand. Im gleichen Jahre wurde ich von meinem Onkel Dr. F. Fisch adoptiert.

Nach zwei vorklinischen Semestern in Lausanne und dem ersten propädeutischen Examen (1948) lag ich meinen Studien in Zürich ob, wo ich 1950 das zweite propädeutische Examen bestand.

Nach einem klinischen Semester Medizinstudium und fünf Semestern Fachstudium am Zahnärztlichen Institut der Universität Zürich erlangte ich im Frühjahr 1953 das Eidgenössische Diplom als Zahnarzt.

Seither bin ich als Assistent auf der Abteilung für Prothetik und Kronen und Brücken des Zahnärztlichen Instituts Zürich tätig.

Im Militärdienst bin ich als Sanitätskorporal im Radf. Bat. 9 eingeteilt.

